DOI:10.24850/j-tyca-2018-03-08

Nota

Turbinas hidrocinéticas de eje horizontal: una revisión de la literatura

Horizontal axis hydrokinetic turbines: A review of the literature

Cristian Cardona-Mancilla[1]

Jorge Sierra del Río[2]

Edwin Chica-Arrieta[3]

Diego Hincapié-Zuluaga[4]

[1]Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia, cristiancardona@itm.edu.co

[2]Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia, jorgesierra@itm.edu.co

[3]Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, edwin.chica@udea.edu.co

[4] Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia, diegohincapie@itm.edu.co

Autor para correspondencia: Diego Andrés Hincapié, diegohincapie@itm.edu.co

Resumen

Las turbinas hidrocinéticas permiten la generación de energía eléctrica a partir de una fuente renovable, utilizando la energía de las corrientes de agua, generalmente de ríos, mares y canales elaborados por el hombre, entre otros. Constituyen una tecnología que contribuye a la conservación del medio ambiente, al no requerir la construcción de represas, dado que su funcionamiento no está limitado a alturas o caídas de agua, siendo una de las principales características diferenciadoras con relación a las centrales hidroeléctricas convencionales. En este artículo se realiza una revisión sobre turbinas hidrocinéticas de eje horizontal, teniendo en cuenta una serie de aspectos de diseño, simulación computacional, materiales empleados en la fabricación y algunas mejoras implementadas para incrementar la eficiencia de este tipo de tecnología, como el uso de

difusores y/o toberas, y la disposición en agua, entre otros. Este trabajo ayudará a identificar algunas de las áreas que han sido abordadas por otros investigadores, además de promover el uso de turbinas hidrocinéticas en el aprovechamiento de la energía disponible en los recursos hídricos de distintas zonas del mundo, que pueden ser empleadas en especial para suministrar energía eléctrica en zonas no interconectadas. Todo ello contribuirá a la mejora de la calidad de vida y sostenibilidad de las zonas donde se emplee.

Palabras clave: difusor, eficiencia, energía renovable, simulación computacional, turbinas hidrocinéticas.

Abstract

Hydrokinetic turbines make it possible to generate electrical energy from a renewable source, using water flow energy, which is usually obtained from rivers, seas, and manmade canals, among other sources. This technology contributes to the conservation of the environment, since it does not require the construction of dams because performance is not limited to the water head, which is one of the main characteristics that distinguishes this technology from conventional hydroelectric plants. This article is a review of hydrokinetic turbines with a horizontal axis, taking into account a series of design parameters, computational simulation, manufacturing materials, and some improvements implemented to increase the efficiency of this type of technology, including the use of diffusers and/or nozzles, their arrangement in the water, and others. This work will help to identify some of the areas that have been addressed by other investigators, as well as to promote the use of hydrokinetic turbines for exploiting the energy available from hydric sources in different regions of the world, which, in particular, can be used to provide electrical energy in non-interconnected zones. All of this will contribute to the improvement of the quality of life and the sustainability of the region where the technology can be used.

Keywords: Diffusor, efficiency, renewable energy, computational simulation, hydrokinetic turbines.

Recibido: 20/02/2017

Aceptado: 04/12/2017

Introducción

La velocidad del agua en un río constituye una fuente de energía limpia y constante. Bajo la premisa de aprovecharla, pero sin tener que construir una gran infraestructura civil como la necesaria en las grandes centrales hidroeléctricas, se han desarrollado diversos tipos de turbinas sumergidas en las corrientes de agua llamadas turbinas hidrocinéticas (THCs). Estas turbinas no dependen de grandes alturas o caídas de agua, lo cual las hace una tecnología de bajo costo y tiempo de implementación, además de presentar un impacto ambiental mínimo (Chica, Perez, Rubio-Clemente, & Agudelo, 2015; Filho, Souza, Rossi, Barros, & Silva, 2010; Gaden & Bibeau, 2010; Yuce & Muratoglu, 2014). Dichas turbinas extraen la energía cinética de corrientes marinas, ríos y canales artificiales, entre otros, convirtiéndolas en potencia mecánica sin interrumpir el flujo natural del agua (Badea, Pricop, & Bobonea, 2014). Sin embargo, presentan una gran desventaja respecto a la baja densidad de energía obtenida, en comparación con las centrales hidroeléctricas convencionales, implicando que su factibilidad económica deba ser estudiada a detalle (Gaden & Bibeau, 2010; Khan, Bhuyan, Iqbal, & Quaicoe, 2009). Las THCs pueden caracterizarse por la orientación del eje rotacional con respecto a la dirección del flujo del agua, clasificándose en turbinas de flujo axial y turbinas de flujo cruzado o transversal. Las THCs de flujo axial tienen su eje de rotación paralelo a la dirección de la corriente, empleando rodetes tipo hélice. Varias disposiciones de este tipo de turbinas se muestran en la

Figura **1**. La turbina de eje inclinado (

Figura **1**a) se usa con más frecuencia en ríos pequeños, mientras que las demás disposiciones (

Figura **1**b, Figura 1c y Figura 1d) se implementan principalmente para extracción de energía en océanos (Vermaak, Kusakana, & Koko, 2014).

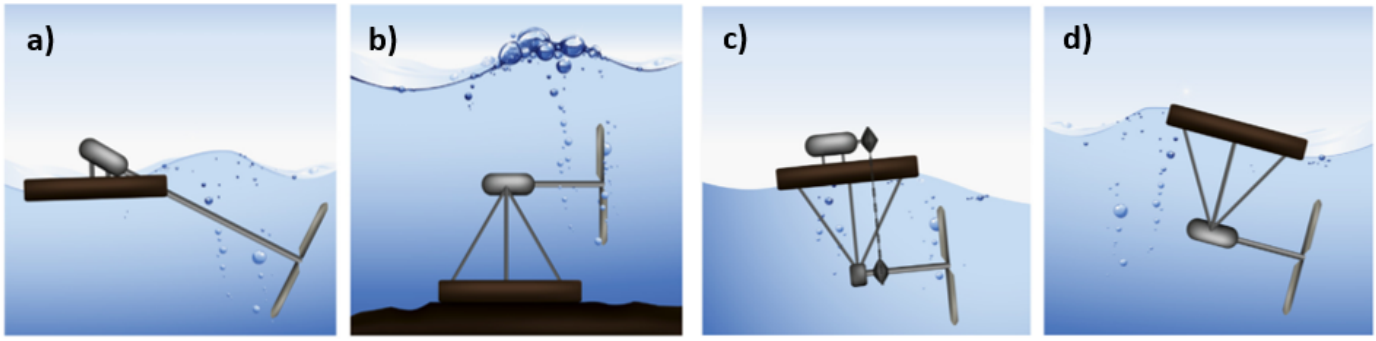

Figura 1. Turbinas hidrocinéticas de flujo axial de: a) eje inclinado, b) amarre rígido, c) generador no sumergido y d) generador sumergido. Fuente: Vermaak *et al*. (2014).

Por otra parte, las turbinas hidrocinéticas de flujo cruzado o transversal (THCFC o THCFT) tienen su eje de rotación perpendicular a la dirección del flujo de agua y pueden operan sin importar la dirección del mismo. Pueden clasificarse en dos tipos. El primero de ellos lo componen las turbinas de eje horizontal en disposición transversal (Figura 2a), las cuales tienen su principio de funcionamiento en la fuerza de arrastre y presentan un rendimiento inferior a las de eje vertical. El segundo tipo, constituido por las turbinas de eje vertical (Figura 2b, Figura 2c, Figura 2d, Figura 2e y Figura 2f), fundamentan su funcionamiento en la fuerza de sustentación, siendo muy utilizadas en aplicaciones hidroeléctricas, gracias a las ventajas ofrecidas con respecto a las turbinas de eje horizontal en disposición transversal. Sin embargo, presentan un diseño y comportamiento hidráulico más complejo (Zanette, Imbault, & Tourabi, 2010).

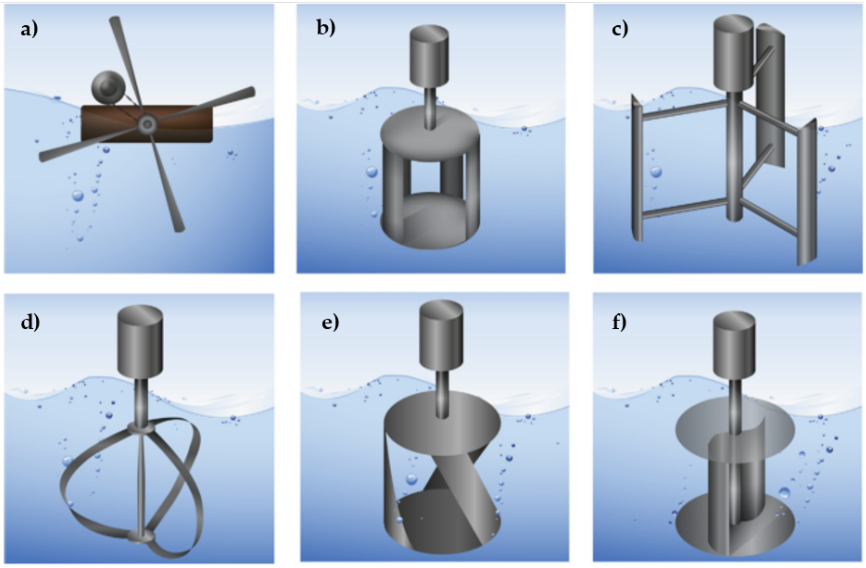

Figura 2. Turbinas hidrocinéticas de flujo cruzado: a) de eje horizontal, b) jaula de ardilla Darrieus, c) H-Darrieus, d) Darrieus, e) Gorlov y f) Savonius. Fuente: Vermaak *et al*. (2014).

El principio de funcionamiento de las THCFC o THCFT consiste en la transformación de la energía cinética del agua contenida en una fuente hídrica natural en energía cinética de rotación de la turbina, esto debido a la corriente de agua que fluye a través de los álabes que están unidos a un rotor. Para algunas de las geometrías de turbinas de eje vertical, como las presentadas en la Figura 2b, Figura 2c, Figura 2d y Figura 2e, el agua entra en contacto con los álabes en dos etapas: en la primera etapa,

el fluido ingresa desde el exterior hacia el interior, y en la segunda etapa el agua fluye desde el interior hacia el exterior de la turbina, realizando la transferencia de energía sobre la misma (Okot, 2013). En las turbinas hidrocinéticas de flujo axial de eje horizontal, la energía cinética del fluido se transfiere en sólo una etapa, lo cual genera velocidades de rotación más altas que las de flujo cruzado o transversal.

La energía contenida en una corriente de agua es directamente proporcional a la densidad del fluido, al área de la sección transversal y a la velocidad del fluido. Por eso, al comparar THCs con velocidades del orden de 1.75 y 2.25 m/s, y turbinas eólicas con velocidades entre 11 y 13 m/s, se presenta una gran diferencia en cuanto al potencial de generación eléctrica, debido a que la densidad del agua es 832 veces mayor que la del aire a condiciones normales de temperatura y presión. En todo caso, es importante indicar que el fluido que pasa a través de la turbina no le entrega toda su energía; de hecho, se ha definido un coeficiente de potencia que indica la cantidad de energía cinética que puede ser extraída del flujo y ser convertida en energía mecánica en el eje de la turbina, y cuyo valor máximo, igual a 59.3%, se conoce como límite de Betz (Koko, Kusakana, & Vermaak, 2015; Shahsavarifard, Bibeau, & Birjandi, 2013; Vermaak *et al*., 2014). Posteriormente, se presenta una extensión de dicha teoría conocida como el límite de Lanchester-Betz, la cual indica que no toda la energía disponible puede ser capturada por la turbina, debido a que esto significaría realizar una obstrucción completa del fluido (Ruopp, Ruprecht, Riedelbauch, Arnaud, & Hamad, 2014). La potencia eléctrica total generada se ve afectada, además de este coeficiente, por las eficiencias del mecanismo de transmisión y del generador, las propiedades físicas del fluido (densidad), el área barrida por los álabes de la turbina y las condiciones de operación (caudal) (Gaden & Bibeau, 2010; Guney, 2011). Otra característica que convierte a las THCs en una alternativa más atractiva es su modularidad y expansibilidad. Ellas pueden ser dispuestas en arreglos de múltiples unidades para extraer más energía de las corrientes de agua (Zanette *et al*., 2010).

Turbinas hidrocinéticas

Pese a las diversas tecnologías existentes que utilizan energía renovable para generar energía eléctrica, algunas no pueden ser empleadas o no cuentan con las condiciones necesarias para obtener una eficiencia óptima

de funcionamiento que les permita mantener una buena relación entre costo-beneficio, tornándose tecnologías insostenibles. Esto se evidencia a menudo en zonas con características ambientales o geográficas especiales, donde se presentan altas precipitaciones, con largos periodos de cielo nublado, que junto a la alta humedad y el crecimiento rápido de hongos y vegetación genera fallas prematuras en paneles solares de energía; áreas densamente boscosas, que no cuentan con las corrientes de aire suficiente para suplir una turbina eólica; o incluso fuentes hídricas de altura insuficiente para alimentar sistemas de microgeneración eléctrica convencionales. Por esta razón, surgen las turbinas hidrocinéticas, como una alternativa capaz de satisfacer la demanda energética de estas zonas, siempre que cuenten con una fuente hídrica (Anyi & Kirke, 2015).

En la actualidad, son muy pocos los estudios realizados sobre THCs, tratándose de una tecnología que se encuentra en su etapa inicial y requiere ser investigada con mayor profundidad (Yuce & Muratoglu, 2014). Se evidencia en la literatura la falta de correlaciones que caracterizan este tipo de turbomáquinas, razón por la cual, la mayor parte de los estudios sobre THCs han sido desarrollados de forma empírica, sobre todo en la etapa de diseño, donde los perfiles de sustentación utilizados en la mayoría de estos proyectos son adaptados de los resultados obtenidos en pruebas realizadas sobre turbinas eólicas.

Diseño de turbinas hidrocinéticas de eje horizontal

Las THCs operan bajo los mismos principios de las turbinas eólicas, compartiendo además filosofías de diseño similares (Anyi & Kirke, 2011; Chica *et al*., 2015; Day *et al*., 2015; Güney & Kaygusuz, 2010; Yuce & Muratoglu, 2014). El diseño de THCEH comienza desde el dimensionamiento del rotor, lo cual se realiza empleando la ecuación (1), partiendo desde la cantidad de potencia P de salida requerida o esperada de la turbina, que está dada en términos de la densidad ρ y la velocidad del fluido V; el área de la sección transversal A barrida por el álabe (modelo de disco); el coeficiente de potencia C_p y la eficiencia del tren de transmisión η (Anyi & Kirke, 2011; Chica *et al*., 2015; Vermaak *et al*., 2014), donde el término $C_p\eta$ debe ser igual a 21% (Anyi & Kirke, 2011):

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 C_p \eta \quad (1)$$

Un parámetro importante en el diseño de THCEH es la solidez, la cual es la relación entre el paso y la cuerda de los álabes, y debe estar alrededor del 30%, con el fin de tener un buen par de arranque y una alta velocidad relativa (Anyi & Kirke, 2010). Otro factor importante es el ángulo de torsión del álabe desde la punta hasta la base, pues un estudio realizado por Lanzafame y Messina (2009) sobre diseños de álabes para turbinas eólicas arrojó que un álabe torsionado presenta un mejor rendimiento en comparación con uno que sea totalmente recto; además, hay otros factores de interés, como la selección del perfil hidrodinámico a utilizar. Se deben tomar en cuenta varios aspectos al momento de diseñar una THC, por ejemplo, el tipo de turbina a utilizar. Para esto, se deben tener presentes los coeficientes de rendimiento de las diferentes turbinas existentes, los cuales están dados por lo común en función de la relación de velocidad de punta (TSR, por sus siglas en inglés: Tip Speed Ratio), definida como "la relación de la velocidad tangencial en la punta del álabe con la velocidad de referencia de flujo libre" (Chica *et al*., 2015). La TSR está representada según la ecuación (2), donde *R* es el radio barrido por el álabe de la turbina, ω la velocidad de rotación de la misma y *V* la velocidad del fluido:

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (2)$$

En la Figura 3 se muestra el diagrama TSR (Tip Speed Ratio) *vs*. C_p (coeficiente de potencia), donde se puede observar que las turbinas de flujo cruzado trabajan a bajas velocidades y tienen bajos coeficientes de potencia, comparados con las turbinas axiales (Guney, 2011); este hecho también necesita ser considerado al momento de seleccionar el tipo de turbina. Otro aspecto importante que se debe tener presente es la variación del perfil de velocidad de la corriente, con el propósito de determinar el punto donde se debería instalar el sistema para obtener una mejor eficiencia. En la Figura 4 se ilustra esquemáticamente cómo varía la velocidad con la profundidad, observándose que en el fondo la velocidad es baja debido a la fricción con la superficie inferior del cauce y se va incrementando hasta un valor máximo, luego se va reduciendo hacia la superficie debido a la fricción con el aire; además, la velocidad varía lateralmente a lo ancho del cauce. Esto fue analizado por Gunawan *et al*. (2012), quienes pudieron determinar que la máxima velocidad se encuentra cerca del centro de la corriente. Neary, Gunawan y Sale (2013)

pudieron demostrar que la turbulencia puede incrementar la eficiencia hidráulica de la turbina en un 12%; entonces, si se desea aprovechar esta energía adicional, se debe considerar el efecto de esta turbulencia en el diseño estructural del sistema.

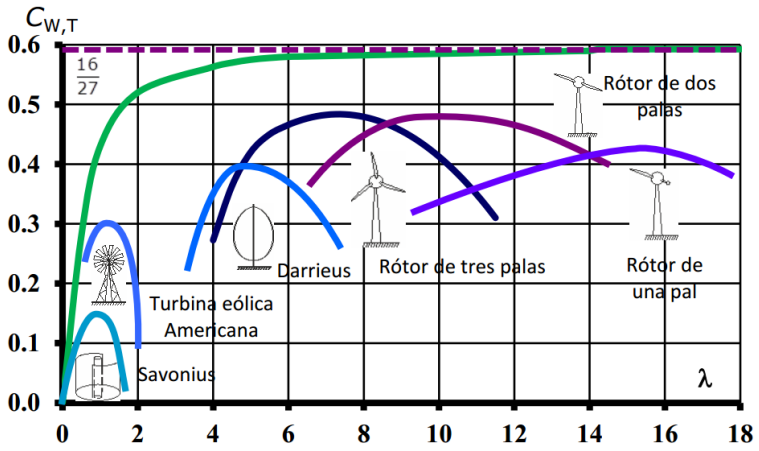

Figura 3. Diagrama TSR *vs*. C_p de diferentes turbinas. Fuente: adaptado de Guney (2011).

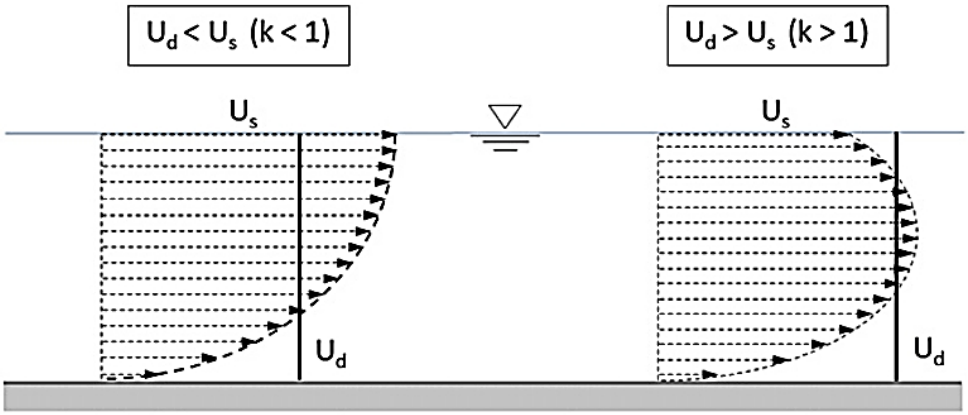

Figura 4. Representación esquemática de la relación entre profundidad y cambio de velocidad de la corriente. Fuente: Gunawan *et al*. (2012).

Simulación computacional de turbinas hidrocinéticas de eje horizontal

Schleicher, Riglin, Kraybill y Gardner (2013) realizan una simulación de una THCEH de dos álabes, con un ángulo de barrido de 144°, para velocidades de la corriente de agua entre 0.5 y 3 m/s, empleando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en ANSYS® CFX, con el modelo de turbulencia k-ε de Navier-Stokes (RANS), para calcular la distribución de presiones y velocidades a su paso por la turbina, además de utilizar los resultados obtenidos en un análisis estructural, destacando entre sus resultados que la cavitación no está presente en las condiciones normales de funcionamiento de la turbina analizada.

Badea, Bobonea y Procop (2014) utilizan simulación CFD Fluent de ANSYS® con el modelo de turbulencia Shear-Stress Transport (SST) k-ω, para analizar una THCEH de tres álabes, con una velocidad de la corriente de agua de 1.5 m/s, obteniendo como resultados el campo longitudinal de velocidad, vórtice de la turbina, energía cinética turbulenta en una sección cilíndrica y distribución de presiones sobre el álabe.

Muñoz, Chiang y De la Jara (2014) analizaron una THCEH de dos álabes, empleando una variación del ángulo de ataque entre 0 y 180°, a partir de un programa propio llamado "Turbem", el cual es de código abierto y permite obtener, además de la geometría de la turbina, las curvas de rendimiento y un análisis estructural de la misma. Además de realizar una validación y comparación de los esfuerzos generados en un primer modelo del álabe constituido por madera y un segundo modelo de madera con recubrimiento de fibra de vidrio y resina epoxi, considerando una velocidad de la corriente de agua de 2 m/s, mediante el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) en el programa Inventor® V2013, obteniendo como resultados un mejor comportamiento por parte del segundo modelo.

Chica, Pérez, Rubio-Clemente y Agudelo (2015) emplean una simulación ANSYS® CFX utilizando el modelo de turbulencia k-ε, en régimen estacionario, para analizar una THCEH de tres álabes, con un ángulo de ataque de 5° y una velocidad de la corriente de agua de 1.5 m/s. Con los resultados obtenidos de la distribución de presiones y velocidades sobre el álabe, realizan un análisis estructural, estableciendo como materiales madera de pino seco, ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y aluminio 6061-T6, aplicando sobre cada uno de ellos un primer recubrimiento de fibra de vidrio (tipo E) y otro de fibra de vidrio con resina epoxi, concluyendo que para los intereses de poblaciones remotas puede emplearse madera como base para la fabricación del álabe con alguno de los dos recubrimientos analizados, presentándose mejores resultados en el comportamiento del álabe al utilizarse fibra de vidrio con resina epoxi.

Schleicher, Riglin y Oztekin (2015) realizan una caracterización mediante simulaciones CFD, con el modelo de turbulencia k-ω Shear-Stress Transport (SST), en régimen estacionario para una turbina hidrocinética

de dos álabes, con una velocidad de corriente de agua de 2.25 m/s, con el fin de predecir estructuras cuasi estacionarias para una amplia gama de coeficientes de la velocidad de punta, obteniendo como resultados la velocidad normalizada, la presión estática normalizada y la vorticidad normalizada a través de la turbina.

Construcción de turbinas hidrocinéticas de eje horizontal

La fabricación de una THCEH no es una labor sencilla, debido a que deben considerarse factores como rentabilidad, inversión, costos de operación y fuentes alternativas, por lo cual, con el fin de mejorar su rentabilidad de forma directa, se deben reducir los costos de diseño, materiales, fabricación y mantenimiento (Muñoz *et al*., 2014).

Para determinar la factibilidad y rentabilidad de un material en la fabricación de este tipo de turbinas es necesaria la implementación tanto de un análisis estructural, que puede llevarse a cabo empleando simulación computacional, como de un análisis de costos, en el cual deben tenerse en cuenta los precios de los materiales, que por lo normal son afectados de forma directa por la disponibilidad local (Muñoz *et al*., 2014). Esto proporciona autonomía a los habitantes para administrar sus propios sistemas, teniendo en cuenta que también son los responsables de realizar su debido mantenimiento (Chica *et al*., 2015).

Así. dependiendo de los equipos, material y recursos económicos disponibles, se pueden fabricar componentes como álabes, difusores y cubos (ejes), entre otros, de la THCEH, con gran precisión, utilizando equipos convencionales CNC (Javaherchi, Stelzenmuller, & Aliseda, 2013; Muñoz *et al*., 2014; Shahsavarifard, Bibeau, & Chatoorgoon, 2015) o máquinas CNC de cinco ejes (Kolekar & Banerjee, 2015); y con menor precisión a partir de procesos más sencillos y económicos, al emplear cortadoras por plasma (Davila-Vilchis & Mishra, 2014) o técnicas de carpintería para la consecución de uno de los álabes, el cual sirve como referencia en máquinas copiadoras, como ruteadoras y sierras giratorias, para obtener cada uno de los álabes de la turbina (Anyi & Kirke, 2011).

Este tipo de tecnología puede fabricarse de manera empírica, ya sea usando equipos de altas especificaciones o mediante pericia, imaginación y herramientas disponibles del fabricante, dependiendo de los requerimientos técnicos de la aplicación final. En diferentes estudios, los autores han sugerido diversos materiales para construir álabes de

turbinas hidrocinéticas. Anyi y Kirke (2011) proponen el uso de madera, pino, en su fase de demostración, para la fabricación del álabe, por ser un material blando y, por ende, fácil de trabajar; pero en especial la denominada "Belian" de gran abundancia en Sarawak, Malasia, por su fuerza, resistencia a insectos de la madera y su estupenda durabilidad incluso al encontrarse sumergida en agua. En adición a esto, Muñoz *et al*. (2014) proponen agregar capas de fibra de vidrio y resina epoxi sobre álabes de madera, para aumentar su resistencia, argumentando que dicha resina servirá también para sellar la madera, protegiéndola contra el deterioro causado por el contacto directo con el agua, lo cual va de la mano con lo planteado por Anyi y Kirke (2010), y Li, Hu, Chandrashekhara, Du y Mishra (2014) de utilizar material compuesto de fibra de vidrio y resina epoxi por la buena relación entre precio y rendimiento, además de poseer características de resistencia a la corrosión, fuerza y robustez, que proporcionan una excelente resistencia a fallas estáticas, en vez de emplear fibra de carbono, que pese a tener mejores características que los anteriores y una reducción de peso, pueden costar entre 10 y 20 veces más que la fibra de vidrio. También se han utilizado álabes de aluminio (Anyi & Kirke, 2015; Javaherchi *et al*., 2013), aleaciones de aluminio (Kolekar & Banerjee, 2015; Schleicher *et al*., 2013) y acero inoxidable (Davila-Vilchis & Mishra, 2014) por su resistencia a la corrosión.

Mejoras empleadas para aumentar la eficiencia de las turbinas hidrocinéticas

Liu y Packey (2014) proponen utilizar THCs directamente a la salida de turbinas ya establecidas de centrales hidroeléctricas convencionales o en sitios vecinos a dichas centrales, lo cual es denominado como Sistema de Ciclo Combinado de Energía Eléctrica (CCHS, por sus siglas en inglés), realizando un análisis sobre los posibles cambios, las ventajas y el beneficio potencial que esto conllevaría, además de mostrar que los conceptos de CCHS han sido empleados y demostrados en dos proyectos realizados en EUA, concluyendo que pese a ser una tecnología atractiva, se requiere un análisis de costos con respecto a las prestaciones generadas con el fin de determinar su viabilidad.

Quizás el mayor obstáculo al que se enfrentan las THCs en cuanto a su implementación en ríos son las partículas sólidas en suspensión derivadas de la acción del hombre, lo cual ha sido evitado en gran medida instalando

dichos dispositivos en zonas donde no se presenta demasiada suciedad, limitando de modo significativo su ubicación, lo que representa un factor fundamental en la generación distribuida (Anyi & Kirke, 2015). Con el fin de dar solución a dicha problemática, Anyi y Kirke (2015) desarrollaron una THCEH capaz de hacer pivotar sus álabes hacia atrás y hacia adelante en su plano de rotación, permitiendo el deslizamiento de residuos y un anillo interno que evita que hierbas u otros elementos puedan enrollarse alrededor del eje, obteniendo como resultado que dicha turbina se conserve prácticamente libre de malezas. Esta turbina presenta un funcionamiento normal al encontrarse en un entorno relativamente limpio (Figura 5a), teniendo la capacidad de adaptarse frente a la aparición e interferencia de residuos, permitiendo el desplazamiento radial para cada uno de sus álabes (Figura 5b), y la facultad de deformación o inclinación de los mismos aguas abajo de la turbina debido a cargas axiales (Figura 5c), actuando como mecanismo de limpieza y protección, al permitir el paso de dichos desechos, proporcionando finalmente la capacidad de los álabes de retornar a su posición inicial.

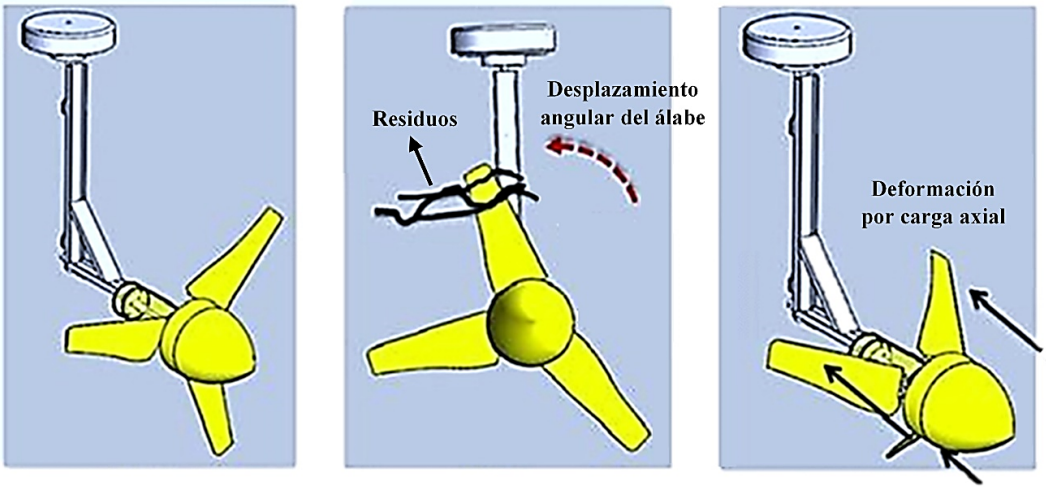

Figura 5. Turbina hidrocinética elaborada: a) funcionamiento normal, b) capacidad del álabe de desplazarse angularmente sobre su eje de rotación y c) capacidad de inclinación de los álabes aguas abajo de la turbina (Anyi & Kirke, 2015).

Uso de difusores o toberas para incrementar la potencia generada de turbinas hidrocinéticas de eje horizontal

Una de las formas empleadas para mejorar la potencia generada por THCEH son los difusores y/o toberas. Un difusor tiene como función principal incrementar la presión del fluido, disminuyendo su velocidad; mientras que las toberas cumplen la función contraria. Todo esto, buscando mejorar la circulación y reducir el estancamiento del fluido aguas abajo de la turbina (Chen, Ponta, & Lago, 2011). Siendo un factor importante a tener en cuenta que la implementación de dichos difusores, permite incrementar el coeficiente de potencia de la THCEH (Chen *et al*., 2011; Chen, Liao, & Cheng, 2012; Gaden & Bibeau, 2010). El problema principal de los difusores es la caída de presión generada a la salida por la extracción de energía de la turbina en el interior del conducto, para lo cual se emplea en este tipo de sistemas una sección convergente, con un ángulo de inclinación relativamente pequeño, y una sección divergente con un ángulo de salida más pronunciado en la parte delantera y trasera del conducto, respectivamente (Chen *et al*., 2011). Para contrarrestar la baja densidad de potencia generada por una THC, Gaden y Bibeau (2010) realizaron un estudio numérico para analizar el uso de difusores, con el fin de mejorar el rendimiento y la viabilidad de THCEH, encontrando que con el difusor propuesto alcanzaban hasta 3.1 veces más de potencia, en comparación con la turbina sin este elemento. Un análisis similar es realizado por Shahsavarifard *et al*. (2015), en el cual se evalúan experimentalmente tres modelos, siendo el primero de ellos una THCEH, el segundo la misma turbina con una cubierta exterior y el tercero dicha turbina con un difusor, obteniendo como resultado una mejora en la potencia máxima de salida del 91% del tercer modelo con respecto al primero.

En la literatura se percibe gran interés en la implementación de difusores, donde gran parte de las mejoras que se han ido desarrollando tienen que ver con la forma presentada por los mismos, sobre todo en las zonas de entrada y salida (Chen *et al*., 2011; Chen *et al*., 2012). Así, se presenta en esta área un amplio campo de estudio, debido a que todavía queda una gran variedad de perfiles de difusores por analizar y más aún con referencia a las turbinas hidrocinéticas, pues gran parte de las investigaciones desarrolladas han sido realizadas sobre turbinas eólicas.

Disposición en agua de turbinas hidrocinéticas de eje horizontal

Se encuentran investigaciones sobre diferentes maneras de distribución de THCEH en ríos, mares, canales o cualquier otro medio en el cual vayan a desempeñarse o a ser analizadas, que van desde la disposición individual de las mismas, siendo la forma más común, hasta configuraciones en serie de varias de ellas, las cuales también permiten incrementar la potencia generada por el sistema o garantizar las condiciones óptimas de operación del mismo.

Filho *et al*. (2010) proponen un sistema de THCs denominado *Poraquê*, el cual está constituido por turbinas hidrocinéticas de eje horizontal, dispuestas en serie sobre un mismo eje, espaciadas y posicionadas de tal manera que no haya interferencia entre rotores. Se analizó mediante un canal artificial. Al utilizar tres (3) turbinas (con diámetros de 1.5 m) a una distancia entre ellas de 710 mm se presenta una eficiencia de 78%, resaltando además que utilizar una mayor cantidad de álabes no es factible debido al poco aumento generado en la eficiencia con respecto al costo de fabricación y montaje, aportando también algunas ideas de mejoramiento del sistema, como la utilización de difusores para dirigir y recuperar la velocidad del flujo.

Otras investigaciones pueden complementar el estudio anterior. Neary, Gunawan, Hill y Chamorro (2013) analizan las perturbaciones en la estela de la turbina, encontrando que la recuperación del flujo en un 80% ocurre cerca, a una distancia, en función del tamaño de la turbina, de 10 diámetros aguas abajo desde el plano del rotor, sugiriendo además que el espaciado entre THCEH sea entre 10 y 15 diámetros del rotor.

Por su parte, Kolekar y Banerjee (2015) estudian los efectos generados por la proximidad de las fronteras de turbinas hidrocinéticas en canales de poca profundidad, encontrando que para obtener un rendimiento óptimo, éstas deben ser instaladas de tal manera que el disco de rotación de la turbina esté a una distancia mínima de la pared sólida del canal, equivalente a un radio del rotor y una profundidad mínima del agua mayor a 3.5 veces el radio de la turbina.

Conclusiones

Los estudios realizados sobre turbinas hidrocinéticas permiten identificar que es una tecnología joven, con un gran campo de aplicación, la cual puede ser utilizada para abastecer energía eléctrica a aquellas zonas que cuenten con fuentes hídricas cercanas, sin necesidad de caídas o alturas de agua; esto la convierte en una alternativa de baja inversión monetaria,

asequible y de poco mantenimiento para poblaciones que por lo general se encuentran en zonas aisladas y no cuentan con muchos ingresos económicos ni una adecuada calidad de vida.

Las turbinas hidrocinéticas cuentan con un amplio campo de investigación. Los estudios hechos se basan en la adaptación de análisis y resultados de turbinas eólicas.

Se trata de una tecnología en etapa de ensayo y error, teniendo en cuenta que aún existe una gran cantidad de perfiles hidrodinámicos por analizar, además de la implementación de diversas mejoras y modificaciones realizadas sobre dichos mecanismos eólicos que pueden ser implementados para incrementar la eficiencia de las turbinas hidrocinéticas.

Se evidencia una mayor confianza en la implementación de simulaciones computacionales para llevar a cabo el análisis hidrodinámico y estructural de turbinas hidrocinéticas, permitiendo su optimización de una forma más fácil, lo cual reduce en gran medida los costos de fabricación.

Hay una gran tendencia en la implementación de difusores para mejorar la eficiencia de las turbinas hidrocinéticas. Una de las grandes problemáticas que puede tener dicha tecnología tiene que ver con los escombros, malezas y demás elementos extraños presentes en los ríos, siendo dos puntos de partida interesantes que pueden ser abordados a la hora de pretenderse desarrollar estudios sobre turbinas hidrocinéticas.

Referencias

Anyi, M., & Kirke, B. (2010). Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 110-116. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.esd.2010.02.003

Anyi, M., & Kirke, B. (2011). Hydrokinetic turbine blades: Design and local construction techniques for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 15(3), 223-230. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.esd.2011.06.003

Anyi, M., & Kirke, B. (2015). Tests on a non-clogging hydrokinetic turbine. *Energy for Sustainable Development*, 25, 50-55. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.esd.2015.01.001

Badea, I., Pricop, M. V., & Bobonea, A. (2014). Design procedure and numerical analysis of a small horizontal-axis hydrokinetic turbine. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 76(3). Recovered from http://www.researchgate.net/publication/265122794

Chen, L., Ponta, F. L., & Lago, L. I. (2011). Perspectives on innovative concepts in wind-power generation. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 398-410. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.esd.2011.06.006

Chen, T. Y., Liao, Y. T., & Cheng, C. C. (2012). Development of small wind turbines for moving vehicles: Effects of flanged diffusers on rotor performance. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42, 136-142. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.05.001

Chica, E., Perez, F., Rubio-Clemente, A., & Agudelo, S. (2015). Design of a hydrokinetic turbine. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 195, 137-148.

Davila-Vilchis, J. M., & Mishra, R. S. (2014). Performance of a hydrokinetic energy system using an axial-flux permanent magnet generator. *Energy*, 65, 631-638. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.040

Day, A. H., Babarit, A., Fontaine, A., He, Y.-P., Kraskowski, M., Murai, M., … Shin, H.-K. (2015). Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices: A state of the art review. *Ocean Engineering*, 108, 46-69. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.036

Filho, G. L. T., Souza, Z. De, Rossi, C. a B. De, Barros, R. M., & Silva, F. D. G. B. Da. (2010). Poraque hydrokinetic turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 12, 12094. Recovered from http://doi.org/10.1088/1755-1315/12/1/012094

Gaden, D. L. F., & Bibeau, E. L. (2010). A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydro kinetic turbines using a validated momentum source turbine model. *Renewable Energy*, 35(6), 1152-1158. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.023

Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, P., & Knight, D. W. (2012). The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 24, 1-12. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.02.001

Guney, M. S. (2011). Evaluation and measures to increase performance coefficient of hydrokinetic turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3669-3675. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.009

Güney, M. S., & Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, 14(9), 2996-3004. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.016

Javaherchi, T., Stelzenmuller, N., & Aliseda, A. (2013). Experimental and Numerical Analysis of the Doe Reference Model 1 Horizontal Axis Hydrokinetic Turbine. In: Proceedings. *1st Marine Energy Technology Symposium METS2013*, Washington, DC.

Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., & Quaicoe, J. E. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86(10), 1823-1835. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017

Koko, S. P., Kusakana, K., & Vermaak, H. J. (2015). Micro-hydrokinetic river system modelling and analysis as compared to wind system for remote rural electrification. *Electric Power Systems Research*, 126, 38-44. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.04.018

Kolekar, N., & Banerjee, A. (2015). Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects. *Applied Energy*, 148, 121-133. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.052

Lanzafame, R., & Messina, M. (2009). Design and performance of a double-pitch wind turbine with non-twisted blades. *Renewable Energy*, 34(5), 1413-1420. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.09.004

Li, H., Hu, Z., Chandrashekhara, K., Du, X., & Mishra, R. (2014). Reliability-based fatigue life investigation for a medium-scale composite hydrokinetic turbine blade. *Ocean Engineering*, 89, 230-242. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.08.006

Liu, Y., & Packey, D. J. (2014). Combined-cycle hydropower systems - The potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations. *Renewable Energy*, 66, 228-231. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.007

Muñoz, A. H., Chiang, L. E., & De la Jara, E. A. (2014). A design tool and fabrication guidelines for small low cost horizontal axis hydrokinetic turbines. *Energy for Sustainable Development*, 22(1), 21–33. http://doi.org/10.1016/j.esd.2014.05.003

Neary, V. S., Gunawan, B., Hill, C., & Chamorro, L. P. (2013). Near and far field flow disturbances induced by model hydrokinetic turbine: ADV and ADP comparison. *Renewable Energy*, 60, 1-6. Recovered from

http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.03.030

Neary, V. S., Gunawan, B., & Sale, D. C. (2013). Turbulent inflow characteristics for hydrokinetic energy conversion in rivers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 437-445. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.033

Okot, D. K. (2013). Review of small hydropower technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 515-520. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.006

Ruopp, A., Ruprecht, A., Riedelbauch, S., Arnaud, G., & Hamad, I. (2014). Development of a hydro kinetic river turbine with simulation and operational measurement results in comparison. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Recovered from http://doi.org/10.1088/1755-1315/22/6/062002

Schleicher, W. C., Riglin, J. D., Kraybill, Z. A, & Gardner, G. (2013). Design and simulation of a micro hydrokinetic turbine. In: Proceedings. *1st Marine Energy Technology Symposium METS13*, Washington, DC.

Schleicher, W. C., Riglin, J. D., & Oztekin, A. (2015). Numerical characterization of a preliminary portable micro-hydrokinetic turbine rotor design. *Renewable Energy*, 76, 234-241. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.032

Shahsavarifard, M., Bibeau, E. L., & Birjandi, A. H. (2013). Performance gain of a horizontal axis hydrokinetic turbine using shroud. *Oceans - San Diego*, 2013, 0-4. Recovered from http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6740968

Shahsavarifard, M., Bibeau, E. L., & Chatoorgoon, V. (2015). Effect of shroud on the performance of horizontal axis hydrokinetic turbines. *Ocean Engineering*, 96, 215-225. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.006

Vermaak, H. J., Kusakana, K., & Koko, S. P. (2014). Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 625-633. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.066

Yuce, M. I., & Muratoglu, A. (2014). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72-82. http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037

Zanette, J., Imbault, D., & Tourabi, A. (2010). A design methodology for cross flow water turbines. *Renewable Energy*, 35(5), 997-1009. Recovered from http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.014